欧洲球载太阳望远镜SUNRISE及相关研究成果的简介*

刘艳霄[1]，宋腾飞[2]，张涛[2]，黄旻[3]，吕群波[3]，项磊[3]，夏利东[4]，孙明哲[4]，宋红强[4]，田晖[5,6]，张红鑫[7]，宋海军[8]，杨晓许[8]，张雪飞[2]，王晶星[2]，刘煜[2]，金振宇[2]，江朝伟[1,9]，林隽*[2,10,11]

(1. 哈尔滨工业大学 空间科学与应用技术研究院，广东，深圳 518055，中国；
2. 中国科学院云南天文台，云南，昆明 650216，中国；
3. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094，中国；
4. 山东大学空间科学研究院, 山东，威海 264209，中国；
5. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871，中国；
6. 中国科学院太阳活动重点实验室，北京，100012，中国；
7. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，吉林，长春 130033，中国；
8. 中国科学院西安光学精密机械研究所，陕西，西安 710119， 中国；
9. 中国科学院空间天气学国家重点实验室太阳-行星际-地磁天气团队，北京 100190，中国；
10. 中国科学院大科学研究中心，北京 100012;
11. 中国科学院大学，北京 100049，中国)

摘 要：利用发射到平流层的球载太阳望远镜来观测太阳**磁场**演化和监视太阳活动有着得天独厚的优势。首先，在平流层中，球载太阳望远镜对太阳的观测不受来自地球对流层大气中天气现象的干扰，处于无视宁度影响的环境中。这为获取高质量的太阳图像提供了优越的条件。其次，平流层的空气已经十分稀薄，对紫外线的吸收也大为减弱。球载太阳望远镜能够在近紫外波段观测太阳活动和爆发。第三，球载太阳望远镜可以通过回收、升级和再利用来降低其使用成本并提高望远镜的利用率，远比空间观测经济实惠。利用球载太阳望远镜开展对太阳的观测研究在欧美已经有半个多世纪的历史。本文简要地回顾了太阳观测的球载任务发展历史，包括在这期间积累的非常丰富的仪器研制和观测经验，详细地介绍欧洲“日出”(SUNRISE)球载任务的仪器搭载、大量的高分辨观测数据和一系列在此基础上完成的高质量的科研成果，为我国球载望远镜的研制提供重要参考。

关键词： 球载任务，太阳望远镜，高空间分辨率，高时间分辨率

中图分类号：TH75　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1007-2276-(2004)4-0338-05

0 引 言

发射到平流层的球载太阳望远镜有着地面太阳望远镜所不能企及的优势。一方面它可以避免受对流层大气扰动的影响从而进行高分辨观测；另一方面它可以获取到太阳在近紫外甚至远紫外波段的辐射特征。由于到达地面的紫外辐射基本上都被其附近的稠密大气所吸收，地面太阳望远镜无法观测到来自太阳的紫外辐射。另外，球载太阳望远镜与空间太阳望远镜相比，也有其独特的优势。首先，它的研制与发射成本比卫星荷载太阳望远镜要低很多；其次，它可以通过回收球载太阳望远镜对其进行反复利用，不断升级改造，提高利用率；最后，球载太阳望远镜的成功经验也将为进一步实施的空间望远镜计划提供具有重要价值的参考。

收稿日期：2020-04-xx；修订日期：2020-08-01

基金项目：这项工作得到了国家自然科学基金(41822404)，中国科学院战略先导专项 XDA17040507; 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSWSLH012)；国家自然科学基金委重点项目(11933009)；云南省创新团队培育项目(2018HC023)；“云南省高层次人才培养支持计划-云岭学者”专项(YLXZ-2018-02478)；国家自然科学基金委面上基金项目(11973083)和地区科学基金项目(11763004)的资助。

作者简介：刘艳霄（1986-），女，河南开封人，天体物理学博士，主要从事太阳物理的研究工作。

针对太阳高分辨观测而开展球载任务具有悠久的历史(表 1 给出了迄今为止所放飞过的球载太阳望远镜及其有关参数)。最早的球载太阳望远镜是由美国普林斯顿大学天文台发起的。他们于 1957 年向距离地面 80,000 英尺(约 24 公里)的临近空间放飞了一个承载着口径为 12 英寸（约 30.5 厘米）望远镜的气球[1]。该球载任务在当年的 8 月 22 日，9 月 25 日和 10 月 17 日分别进行了飞行。由于望远镜没有能够很好地指向太阳，第一次飞行没有获得到较好的科学数据。在第二次飞行中，一共获取了 8,000 幅照片。其中的 400 幅是对准太阳进行拍摄获得的。在这 400 幅照片中，约有 5 幅照片得到了米粒清晰的图像。第三次飞行任务中，他们得到了更多米粒清晰的图像，同时也获取到了日面边缘图像。两年后，他们对仪器进行了改进，增加了可视化(电视)、遥测和远程控制等功能，并于 1959 年再次进行了飞行观测任务[2]。这次观测获得了米粒、日面边缘和太阳黑子精细结构等高分辨观测图像。获得的观测资料在多年之后仍然具有很高的参考价值。1975 年，他们在原来的基础上配备了一个光谱仪并再次进行了飞行观测。遗憾的是，这次飞行任务只获得了米粒的数据[3-5]。

前苏联的平流层太阳天文台有过四次的飞行观测实验[6-8]。前三次球载太阳望远镜口径为 0.5 米，第四次口径为 1 米。其中，第三次观测提供了米粒组织和太阳黑子在 Hα及其偏带的观测资料。通过对比在 Hα线心观测到的暗芒(mottle) 和在线翼观测到的光球米粒，他们发现暗芒的尺度比米粒大好几倍[7]。

约翰 霍普金斯大学的应用物理实验室于 1996 年 1 月 7 - 26 日期间在南极发射了一个搭载着口径为 80 厘米望远镜的气球。该望远镜配备着一个法布里珀罗磁像仪[9]。由于望远镜对太阳的指向稳定程度不够高，图像运动补偿器无法将图像的抖动幅度控制在 0.1"以内，加之望远镜聚焦和后来的图像对齐方面存在的问题使得这次观测得到的图像分辨率比较低，从而导致这次飞行任务没有得到很好的科学数据[10]。针对这些问题，他们对望远镜进行了改进[10,11]，并于 2000 年 1 月进行了为期 17 天的观测。他们获得了一系列在 Ca I 6122.2 Å 波段的单色光、磁图和多普勒图像，以及在 Hα波段的单色光。在获得的 5 万幅图像中，最高的空间分辨率达到 0.5"[12]。

法国国家空间研究中心联合法国恒星与行星物理实验室于 1970 年 10 月 05 日和 1971 年 06 月 24 日分别放飞了一个载着口径为 20 厘米望远镜的气球进行紫外波段观测[13]。他们获得了在 2000 Å，2100 Å，3100 Å 和 4600 Å 一共 4 个波段的观测资料。在 3100 Å 和 4600 Å 的波段上，他们观测到了清晰的米粒和光斑；随后，他们进一步更新了仪器，增大了望远镜口径，并于 1982 年 10 月 01 日成功地将搭载着 30 厘米口径望远镜的气球放飞到距离地面 38 公里的平流层进行观测[14]。观测数据在 1900 Å- 3000 Å 波段之间达到了 0.5" 的空间分辨率。该望远镜配备了一台紫外光谱仪并分别在 1900 Å- 2130 Å 和 2720 Å - 2930 Å 之间的波长范围内获得了分辨率为 0.015 Å- 0.02 Å 的高分辨光谱数据。

表 1 球载望远镜基本参数

Table 1 Parameters of the Balloon-Borne Missions

科研机构	美国普林斯顿大学天文台	前苏联平流层太阳天文台	约翰 霍普金斯大学应用物理实验室	法国国家空间研究中心联合法国恒星与行星物理实验室	德国马普太阳系研究所
任务名称	Unmanned balloon	Soviet solar Stratoscope	Flare Genesis Experiment	Balloon-borne ultraviolet solar telescope	Sunrise
望远镜	折射式	-	折射式	反射式	反射式
口径	0.3 m	0.5 m; 1m	0.8 m	0.2 m; 0.3 m	1 m
空间分辨率	0.38"	0.24" – 0.3";0.12"	0.5"	0.5"	0.10" – 0.18"
观测波段	5450Å	5250Å 4384Å – 4800Å	6122.2 Å	1900 Å – 3000 Å	2140 Å，3000 Å，3120 Å，3880 Å，3968 Å，5250.2 Å
观测日期	1957/8/22 1957/9/25	1966/11/1, 1967/09/22,	1996/1/7 2000/1/10	1970/10/05 1971/06/24	2006/06/08 2013/6/12

	1957/10/17	1970/06/30, 1973/06/20			
指向精度	1"	-	2"	2-3"	1-2"

德国马普太阳系研究所于 2006 年 06 月 08 日 06：27 UT 从瑞典北部放飞了名为“日出”的球载太阳望远镜。望远镜对日面中心的宁静区进行了多波段成像观测，并在 Fe I 5250.2 Å 波段进行了偏振测量[15,16]。他们于 2013 年 06 月 12 日开展第二次球载飞行任务，并将观测目标锁定在一个活动区附近[17]。两次球载任务都获得了很好的科学数据和丰富的科学产出，发表了约 50 篇科研论文。目前，第三次球载任务正在积极筹备当中[18]。

本文将重点介绍“日出”球载任务的仪器装置以及两次飞行任务所取得的科学成果。其中，第 2 节介绍了“日出”球载任务的仪器装置；第 3 节介绍了“日出”球载任务两次飞行任务的具体情况。第 4 节介绍了两次飞行任务取得的观测数据。第 5 节介绍了根据两次飞行任务得到的观测数据所取得的科研成果。第 6 节对“日出”球载任务的成功之处进行了总结，并对我国未来可能推动的球载任务进行展望。

1 “日出”球载任务的仪器装置

“日出”球载任务的仪器装置由一个口径为一米的格雷戈里望远镜(Gregory-Type Reflector Telescope)[19]，一个焦后仪器平台(Postfocus Instrumentation Platform, PFI)[20]和一个具有指向和跟踪能力的吊舱工作台(Gondola)[21]组成。一米格雷戈里反射望远镜拥有 25 米的有效焦距。位于主焦点的排热楔(Heat Rejection Wedge)可以反射 99% 照射到其表面的太阳光，将透过主焦点的热辐射控制在 10 瓦左右。焦后仪器设备包括一个紫外单色光成像仪(Sunrise Filter Imager, SuFI)[22]、一个磁像仪(Imaging Magnetograph eXperimet, IMaX)[23]、一个稳像和光分配系统(Image Stabilization and Light Distribution system, ISLiD)[22] 以及一个波前改正系统(Wave-Front Correction System,WCS)[21]。吊舱工作台为望远镜、仪器和电源等装置提供一个外罩，并保证望远镜的稳定度、跟踪精度和指向精度。图 1 给出了“日出”球载太阳望远镜系统放飞前的场景（左图）以及望远镜的总览图（右图）。下面我们分别介绍望远镜和上述几个仪器装置。

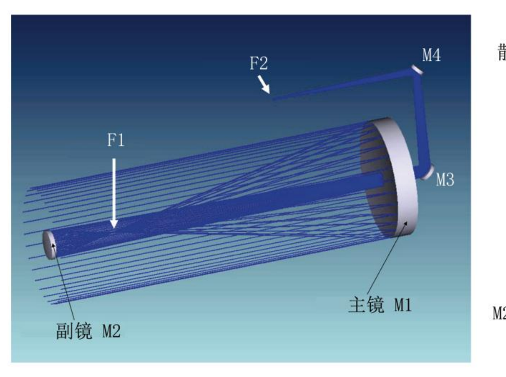



图 1　“日出”球载太阳望远镜总览[20]。左图为日出球载太阳望远镜即将放飞的情景。右图为球载任务的仪器装置总览图。

Fig1 SUNRISE Mission overview. The left panel presents the scene before the SUNRISE was lunched, and the right panel shows the instruments broad on the SUNRISE[20].

1.1 一米格雷戈里望远镜

“日出”球载太阳望远镜是一个重量比较轻的格雷戈里型反射式望远镜。主镜 M1 的镜面为抛物面，有效通光口径为 1 米。图 2（左）展示了望远镜的光路图：来自太阳的平行光通过主镜 M1 反射，聚焦到第一焦点 F1 上，在 F1 处形成一个真实的太阳像。**在 F1 处设置的光阑(Field Stop)允许一小部分光通过并到达副镜 M2 上，减小了到达副镜以及之后光学器件的热量。**M2 的等效直径为 0.245 米，焦距为 0.505 米。从 M2 反射出来的光经过两个 45°镜 (M3 和 M4) 反射后重新汇聚到位于主镜上方的焦后仪器平台中的第二焦点 F2 处。置于第二焦点 F2 处的光阑进一步将视场限制在 180" 之内。



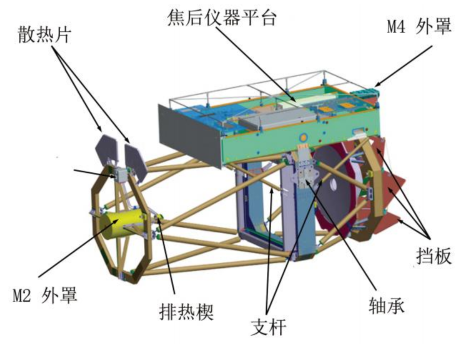


图 2 格雷型反射望远镜光路图和望远镜装置的整体结构图[20]。

Fig 2 The optical design of Gregory-Type Reflector Telescope in left panel and the sketch of telescope structure in right panel[20].

图 2(右)展示了望远镜组件的整体结构图。黄色的钢支架通过连接围绕主镜的后环、围绕副镜的前环以及中央支架，将望远镜组件以及焦后仪器装置支撑和固定起来。围绕着副镜的组件有排热楔、八角形的前环、安装在前环上的散热片(HRW radiators)、洛克希德中等分辨率太阳感知器(Lockheed Intermediate Sun Sensor, LISS)和全程高度仪(Full Range Elevation Device, FRED)。其中，LISS 和 FRED 属于吊舱工作台上的组件，LISS 用于帮助望远镜指向太阳，而 FRED 则负责跟踪太阳。前环以及安装在前环上的组件一直面对着太阳并接收来自太阳的高温辐射。位于前环上的散热片和第一主焦点处的排热楔主要负责为望远镜组件降温。

围绕着主镜的组件主要是后环、三个片状挡板和两个 45°镜 (M3 和 M4)，后环主要用于支撑主镜(图 2a)。主镜背面的片状挡板的外侧可以较好地反光，使镜子避免接触到来自地面的红外辐射和来自地面(冰)或气球下面的海洋的阳光反射，负责控制主镜的温度；主镜正面的表面涂层为铝涂层，厚度为 100 纳米。镜面涂层吸收了约 80 瓦的太阳辐射。M3 和 M4 主要负责接收来自 M2 的反射光并改变其光路使第二焦点落在主镜上方。第二焦点位于主镜上方的好处是能够很好地将不同功能的仪器集成在一个小空间里，大大地缩小了整个气球装置的体积。

中央支架的左右两侧各安装了一个连接吊舱工作台的具有车轴功能的轴承（Gondola interface, elevation axis），它恰好与望远镜装置连同焦后设备的重心在同一个高度上。因而这两个轴承有两个主要功能：一个是将望远镜和吊舱工作台连接起来，一个是使望远镜能够通过这对轴承构架的横轴来调整其俯仰角大小。望远镜对太阳的精确指向也主要是通过调整其俯仰角大小来实现的。前环、后环和支架均采用碳纤维增强型塑料复合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastic Composite Materials)制成。它们具有强度高、重量轻、热膨胀小等优点。支架的刚度设计可以保证前环和后环在重力负荷中的横向位移大致相同，可以有效地保持仪

器之间的平行。即使支架因为重力负荷变化而发生相对横向位移，它们之间的连接结构也能够保持主要部件之间的平行，同时能够将 M1 和 M2 的位置变化控制在毫米量级上。

入射光到达主镜正面镜面并反射，在 F1 处汇聚成一个横截面直径为 22 毫米的圆形光束，辐射功率高达 1 千瓦。为避免如此高的能量聚集对其他设备的影响，需用散热器对其进行有效降温。如图 3 所示，在 F1 处安装了一个排热楔。它是一个高导电的圆筒状铝块，它的楔形正面反射涂层（紫外反射增强涂层）能将来自主镜 99% 的入射光反射掉；而排热楔吸收掉的能量则被排热管(heat pipe)传到前环上的散热器上，将排热楔的温度降至 25° C 以下从而避免了图像干涉条纹的形成，进一步避免了由于条纹的形成而导致的波前变形。排热楔能够将通过中心圆孔的太阳辐射功率控制在 10 瓦左右。

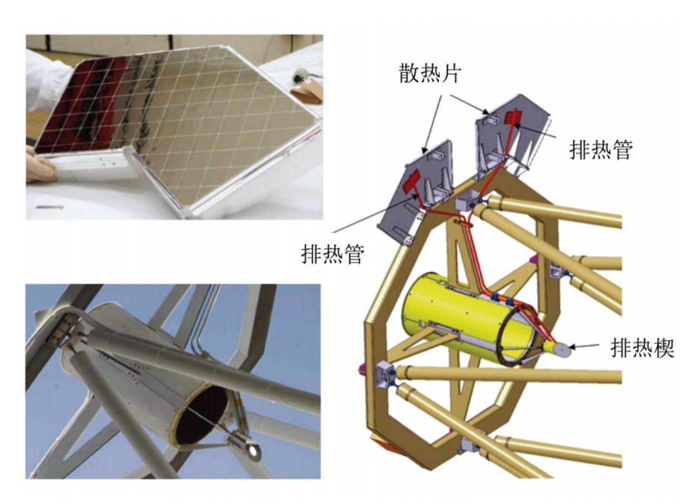


图 3 副镜及前环组件[20]。焦点 F1 处安装了一个排热楔。其中心的小圆孔只允许一部分光透过并到达副镜 M2 处，形成视场光阑。排热楔的表面涂层一方面可以反射 99%的入射光，一方面吸收一小部分能量并通过排热管送到散热片。这样可以保持排热楔的温度在 25 ℃ 以下。

Fig 3 the secondary mirror and front ring[20]. The heat rejection wedge(HRW) mounted on focus F1 could reflect 99% light from the primary mirror, absorb and drain the rest heat into the two radiators through heat pipes to keep the HRW temperature last at 25 ℃.

由于在第一焦点 F1 周围聚焦的能量非常高，一旦光路失去控制，就很可能会损坏附近其他的结构部件。针对这种意外情况所采取的保护措施是在中央支架朝向太阳一方的平面上安装一个可伸缩幕帘。它能够在太阳感知器指向不准确等意外事故发生时通过遮挡主镜来保护主镜部件。可伸缩幕帘从启动到将主镜孔径完全遮挡住所需要的时间约为 20 秒，远低于视场光阑附近部件的临界曝光时间。在飞行过程中，可伸缩幕帘是由计算机指向系统控制的。当指向误差超出±15′时，可伸缩幕帘就开始进入遮挡模式，直到指向精度被控制在±20"以内时才退出遮挡模式。这样就可以很好地保护主镜部件。

1.2 焦后仪器平台

焦后仪器平台位于望远镜装置的上方(见图 2 右子图标注)。其宽度与望远镜装置的宽度相同，约为 1.4 米，长度约为 2 米。这样的面积大小恰好能够容纳所需安装的仪器，其高度为 350 毫米。这样的高度设定主要考虑了两个方面的因素：一方面是尽可能降低焦后仪器平台的重心；另一方面则是考虑随着高度变化而增加的弯曲度和扭转刚度之间的平衡。焦后仪器平台装载了一台单色光成像仪、一台磁像仪、一个稳像和光分配系统以及一个波前改正系统。将这些相互独立的模块集成、安装和对齐之后就可以将它们置入焦后仪器平台的相应位置上。

将它们设计成相互独立模块的优点是，每个模块都可以在其内部达到最大的刚度。这一方面有助于尽可能地减少焦后仪器平台内部因为重力负荷变化而产生的对准误差。另一方面，避免因为模块与平台之间不同程度的热膨胀所导致的模块内部的机械张力，并能够使各模块之间的水平对准精度在所有方向上都保持在 ±0.2 毫米的范围内。这个对准精度可以保证模块之间光学接口上的最大图像偏移量在容许范围以内；而模块相对于固定点的瞄准误差在所有方向都控制在 3′ 的范围内，各个模块相对光瞳的位移量都控制在光瞳直径 5% 的范围以内。这样，各仪器校准精度都能够保持在 ±0.1 毫米范围内。

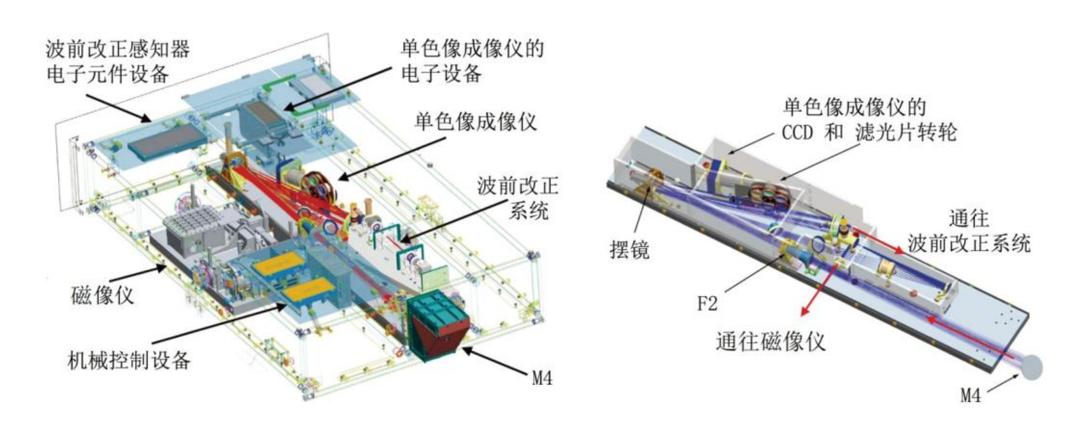


图 4 焦后仪器装置图总览(左)和焦后仪器中的光路图(右)[20]。

Fig 4 The Postfocus Instrumentation Platform(PFI)[20].The left panel is the overview of PFI, and the right panel is optical design in the PFI.

图 4 展示了焦后仪器装置图总览(左)和焦后仪器中的光路图(右)。焦后仪器平台分别装载了机械控制设备(Mechanism controllers)和波前改正系统，磁像仪和单色像成像仪，波前改正感知器电子元件设备(CWS prox. Electronics)和单色光成像仪相机电子设备(SuFI camera electronics)，以及镶嵌在焦后仪器平台中并与各个装置接口相兼容且负责光路稳定的稳像和光分配系统。右图主要展示了焦后仪器中的光路图。光线从光学入口 M4 处进入焦后仪器平台(见 M4 处的红色箭头指向的蓝色线)。首先汇聚到第二焦点 F2 处，然后经过斜置反射镜改变光路方向。一部分光线分配到单色光成像仪端口，一部分光线分配到磁像仪装置和波前改正系统共同的端口处，再进一步将对应波段的辐射分配到磁像仪装置和波前改正探测器装置中。

焦后仪器平台的底端由两块 10 毫米厚的碳纤维增强型塑料复合材料板拼接而成。它们一方面将焦后仪器平台上的设备组件与望远镜组件隔开，另一方面在保护焦后仪器平台组件方面起到了抗拉伸的作用。总体来说，具有很高的刚度-拖曳比是这种焦后仪器平台结构的一个突出优点。而采用碳纤维增强型塑料复合材料板也进一步保证了焦后仪器平台的热膨胀最小，保证了飞行过程中焦后仪器平台的几个模块在不同热载荷和机械载荷的情况下都能够很好地保持光学准直。

焦后仪器平台内安装的相机和电子设备需要进行辐射冷却。在平台内配备的散热器可以使相机镜头(工作温度在 5℃至 10℃之间)及其附近的电子元件(工作温度低于 45℃) 在可接受的温度范围内工作。散热器尺寸和表面特性是在综合考虑飞行情况和所需的工作温度并根据热性能分析之后确定的。焦后仪器的热性能设计还需要考虑热稳定性，它要求在 2 米长的仪器平台上的总温度(包括梯度) 必须保持在 20±10℃的范围内。这一方面保证了非碳纤维增强型塑料复合材料制成的仪器，如磁像仪的准直保持不变，另一方面还保证了光学偏振特性的变化处于最低水平。

1.2.1 单色光成像仪

单色光成像仪提供紫波段和近紫外波段的成像观测资料。其观测波段包括 2140 Å (透过带宽 100 Å)、3000 Å(透过带宽 50 Å)、3120 Å(透过带宽 12 Å)、3880 Å(透过带宽 8 Å)、和 3968 Å(透过带宽 1.8 Å)五个波段。单色光成像仪采用的是改造后的施瓦西显微镜(Schwarzschild Microscope)结构。施瓦西显微镜是紫外线显微镜中很常见的一种。它们可以有很大的数值孔径并能够覆盖相当大的视场。

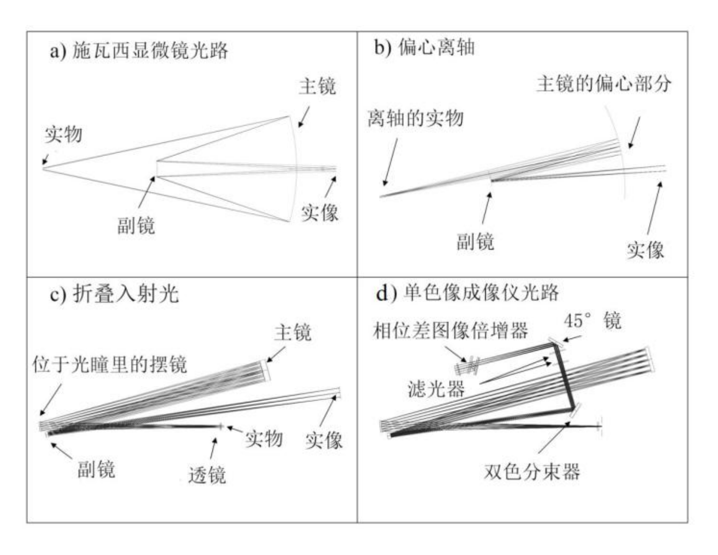


图 5 单色光成像仪的光学设计原理图[21]。其中，a)为施瓦西显微镜原始光路图。b)偏心离轴光路图。c)折叠式入射光路。d)改造成功的光路图。

Fig 5 The optical path design of SuFI[21]：a) Principle of a Schwarzschild microscope. b) off-axis decentered pupil configuration.c)Folded configuration of the Schwarzschild system. d) The final optical design of SuFI.

图 5 描述了从施瓦西显微镜原理图到单色光成像仪光学设计图的改造步骤。原始的施瓦西光学结构只利用了镜面的一小部分。图 5b 中的设计对光路采用了偏心离轴的改造。离轴指的是使实物和最终所成的图像不在主镜的光轴上。在图 5b 光路的基础上，图 5c 在入射光束处加一个摆镜，将入射光的初始入射方向进行了调整。这个摆镜是一个平面反射镜，也可以用作图像运动补偿器(Image Motion Compensator)。它主要用来补偿观测目标的运动，使其在成像平面上有一个稳定的图像。

对图 5c 中的光路图作进一步的修改，就得到了在单色光成像仪上使用的光路(图 5d)。在此光路中，在成像之前的出射光光路上加了一个双色分束板(dichroic beam-splitter plate)。该分束板反射波长短于 4500 Å 的辐射而允许波长超过 4500 Å 的辐射透过。被选择的光束波长短于 4500 Å ，从分束板中出来，通过两个滤光器、经过一个 45°镜改变方向，并经过一个相位差异图像数量倍增器(phase diversity image doubler)最后光束被 CCD 探测到并成像。其中，加两个滤光器目的是过滤掉杂散光。这主要是因为从分束板中出来的紫外光强度相对于其它长波波段的光强度要弱很多，也很容易被周围杂散光淹没。因此，为了排除单色光被杂散光再次污染的可能性，从两个滤光器出来到 CCD 之间的光路是被封闭起来的，也就是说 45°镜、相位差倍增器都被封装在密闭空间里。

1.2.2 磁像仪

磁像仪主要在 Fe I 5250.2 Å 波段（$g = 3$）观测并获取偏振信息。偏振图像视场大小为 50"×50" 。观测主要在谱线 Fe I 5250.2 Å 的线心附近的几个波长点开展，并在一个接近连

续谱的波长点进行偏振测量，噪声水平为 10^{-3}。这里的波长点指的是波长偏离 Fe I 5250.2 Å 线心一定带宽的观测点，比如常用的波长点为波长偏离线心 ±80 mÅ、±40 mÅ、+227 mÅ 的观测点。时间分辨率可以通过观测的波长点数量(3 到 12)和不同的偏振状态数量(*I, Q, U, V*)来调节。磁像仪还可以进行光谱观测，光谱分辨率为 85 mÅ。光谱分辨率的调制和采样通过一个固态的 F-P 干涉仪(LiNbO3 Fabry–Perot etalon)来完成。

磁像仪的光路图及结构图如图 6 所示。光线从焦点 F4 入射到磁像仪，第一个遇到的仪器是前置滤光器(prefilter)，只有中心波长附近 1 Å 范围内的光通量进入前置滤光器，其余的直接送入光阱使其被全部吸收。尽管大部分的紫外波段光子已经被定向送到单色光成像仪光路中[23]，但是仍有部分紫外波段的光子残留在光束中。前置滤光器可以保护液晶相位可变延迟器不受任何残留的紫外光的影响。从前置滤光器出来的光束进入两个液晶相位可变延迟器。第一个延迟器的光轴(顺着进入磁像仪的光的方向)平行于分束器(beamsplitter)的一个线性偏振方向，第二个延迟器的光轴方向与第一个光轴方向的夹角为 45°。

偏振态的调制通过特定电压驱动延迟器来实现。这两个延迟器组合在一起可以产生四个线性无关的偏振态 [I1，I2，I3，I4](N*p*=4) 或提供纵向偏振 (N*p*=2) 的 I+V 和 I-V 的两个经典偏振态。通过液晶相位可变延迟器的光线到达准直透镜(Collimator doublet & lenses)并第一次通过热稳定外壳。这个外壳主要为其内部装置(LiNbO3 F-P 干涉仪)提供温度稳定的环境，其前后两端各有一个熔融硅玻璃窗口。光线穿过位于热稳定外壳前端的窗口和安装在其内部的 F-P 干涉仪并从其后端的窗口穿出，紧接着遇到两个装有通光孔径光阑(folding mirrors & aperture stop)的 45°镜，通过 45°镜反射后再次穿过 LiNbO3 F-P 干涉仪。从 LiNbO3 F-P 干涉仪出射的光束依次通过双重照相(camera doublet)、45°镜、分束器。分束器将光线分为相互垂直的两束光，一束送往 CCD 终端成像，一束通过相位差板再送到 CCD 成像。从液晶相位可变延迟器到分束器之间的光路中，光束的偏振态保持稳定不变。

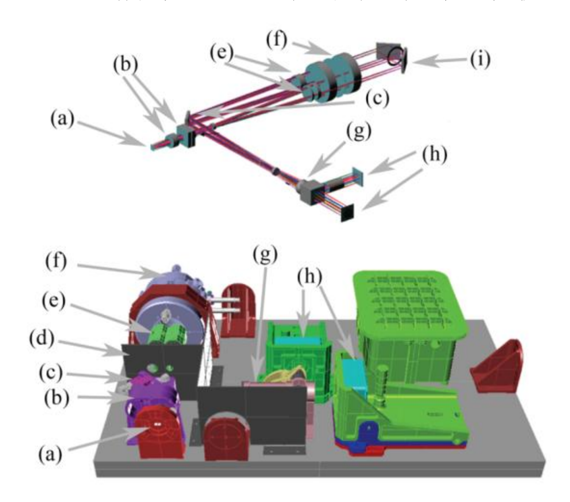


图 6 磁像仪光路图(上)和对应的三维结构图(下)[22]。为了便于理解，图中用字母将光路和三维结构中对应的仪器标注了起来。在光路图中，(a)F4；(b)前置滤光器、两个延迟器；(c)45°镜；(d)灰色挡板；(e)准直镜；(f)F-P 干涉仪；(i)45°镜和孔径光阑；(g)前后两个透镜、分束器。(h)CCD 终端。光路的三维结构图，F4 被棕红色的装置封装(a)，用于光束通过；(b)是安装有前置滤光器和两个延迟器的紫色装置；(c)鲜红色装置的 45°镜；(d)遮挡杂散光的灰色挡板。挡板上有两个小孔。(e)绿色装置的准直镜；(f)安装在银灰色热稳定外壳里的 F-P 干涉仪；(i)两个 45°镜；(g)粉红色的分束器；(h) CCD。

Fig 6 The IMaX optical(top panel) and the opto-mechanical(bottom panel) design[22]. The instruments are listed in the following:(a)F4 position,(b) the prefilter and the two LVCRs,(c) 45°tip-tilt mirror,(d) gray -light baffle,(e) collimator (f) LiNbO3 F-P etalon enclosure, (g) beam splitter, (h) CCD.

现代偏振器(如 Hinode/SP)主要通过高信噪比、快速偏振调制和双光束结构这三种方法来保持其高灵敏度。信噪比主要通过图像积累手段来提高，是决定仪器光度和偏振信号灵敏度的关键参数。高信噪比能保证探测到望远镜观测能力范围内的最弱的光度强度 δI 和最小偏振度 δp。科学界已达成普遍共识，检测宁静太阳网络内区域的弱偏振信号所要求的最低信噪比 (S/N) 为 10^3。测量太阳表面弱磁场对仪器探测能力的要求很严格。针对太阳宁静区环境内的磁对流模拟给出的磁场强度分布表明磁场强度从 1G 单调增加到若干 kG。探测强度为 1G 的纵向磁场产生的偏振信号需要在足够短的时间内探测到大约 2×10^7 个光电子。在这段时间内，磁场本身不能有明显的变化。目前可用的 CCD 有大约 10^5 个电子的满阱。也就是说一次曝光只能探测到很少一部分的光电子。所以，单次曝光不可能达到这些偏振灵敏度所要求的光电子个数。因此，在单次曝光中，现代太阳偏振计引入图像积累以增加光电子数，N_A，以达到所需的偏振灵敏度或信噪比。该方案在最新的斯托克斯偏振仪上得到了成功的应用和推广[24]。磁像仪也采用了这种实时增加曝光次数的方法将信噪比提高到 $\approx10^3$ 。

对于光谱分析，磁像仪使用两个光学系统的组合：一个 1 Å 半高全宽(FWHM)的前置滤光器和一个双通 LiNbO3 F-P 干涉仪。这种干涉仪在过去已经被用于太阳物理学的研究中[11]。不过，干涉仪在磁像仪中使用的概念是新颖的。磁像仪光谱概念的基本原理如下：干涉仪内部有两个平行的镜面，当光线进入 F-P 干涉仪，光线在两个镜面之间经历多次反射。光线每次反射形成的干涉在发射光束和反射光束之间形成一个调制。最后，从干涉仪出来的光将在给定的波长处产生一系列的强度峰值，形成光谱图。该仪器主要通过调制干涉仪镜面的反射率来进一步调制仪器的谱线灵敏度，并结合提高信噪比来提高光谱分辨率。

1.2.3 波前改正系统

波前改正系统的主要部件是夏克-哈特曼型(Shack –Hartmann)波前探测器、高速照相机(>1 kHz)、闭环控制计算机，其主要功能是将夏克-哈特曼型波前探测器测得的光波波前在传播过程中发生的畸变转换成电信号，驱动快速主摆镜(摆动速率 1700 Hz)和慢速副镜 M2 (摆动速率 0.1 Hz)[27,28]，对波前发生的畸变作出相反方向的动作以抵消相应的畸变。因此，波前改正系统主要有两个方面的应用：一个是作为快速的波前探测器导出控制信号，驱动摆镜作出调整抵消图像运动的动作；一个是作为慢速波前探测器，用于望远镜副镜的焦点主动对准控制。

1.2.4 稳像和光分配系统

“日出”球载太阳望远镜对观测目标进行多波段观测时，一方面需要入射光保持稳定，另一方面需要将各个波段的光线精确无误地送到对应的滤光器的位置。为了满足这两个条件，需要在焦后仪器平台上装载一个稳定可靠的稳像和光分配系统。稳像和光分配系统是一个复杂的光学装置，它需要同时完成不同的任务：第一，它负责稳定入射光束，为科学装置和波前改正系统提供稳定的入射光；第二，它要能够把特定波段光束从入射光中分离出来并将其送到对应的滤光器处，同时将剩余的入射光输送到波前改正系统中；第三，它允许透过的光的波长范围必须覆盖不同仪器所需的波长，而这要求它能够在给定的位置和给定的方向提供匹配的光学接口；第四，光学系统在任何环境下，包括在气球上升期间，都必须保证科学仪器能够在衍射极限内的正常工作；第五，稳像系统必须将残余指向误差降低到一个特定的阈值以下从而保证因残余指向误差导致的图像模糊不会影响图像质量。

1.3 吊舱工作台

吊舱工作台位于气球下方 100 米处。其有效载荷为 1919.6 千克，长和宽均为 5.5 米，高为 6.4 米。它为望远镜、焦后仪器平台、电源等提供一个外罩，还负责为望远镜准确定向。吊舱工作台自动驾驶仪将望远镜朝向太阳的指向精度控制在 ±45" 范围以内。在这个范围内，波前改正系统与稳像和光分配系统能够补偿残余运动使科学仪器持续平稳地观测。吊舱工作台的方向控制通过其顶部的动量传递单元完成。电力由封装在望远镜左右两边的太阳能电池板提供，控制电力的仪器装在工作台后侧的支架上。两个数据存储器被安全地装载在工作台核心框架上部的一个桁架内部，这为数据安全存储提供了保护，并便于着陆后数据的提取与恢复。吊舱工作台具有桶形外观。其核心结构组成材料为铝/钢管框架，它相对轻巧又能够提供所需要的刚度和足够高的特征频率(大于 10 赫兹)。这种结构可以将望远镜分成上下两半从而由两个 U 形组件构成，这样可以方便地集成科学仪器，并允许望远镜的俯仰角范围控制在 –5 °到 50 °之间。

望远镜的方位角主要通过位于吊舱工作台顶部的粗调方位角电机和细调方位角电机控制。由于球载装置在上升过程中是旋转上升的模式，粗调方位角电机主要负责将吊舱工作台从气球的旋转运动中解耦，细调方位角电机则通过加速和减速反作用轮使吊舱工作台旋转到特定的方向。反作用轮的额定转速为 10 转每分钟(r/min)。电机的转动提供吊舱工作台旋转的转矩，其大小与电机的频率成比例。粗调方位角电机与细调方位角电机之间的驱动范围按频率划分，粗调方位角电机补偿转矩的频率范围在 0.1 赫兹以下，反作用轮补偿转矩的频率范围为 0.1－1 赫兹。

望远镜的俯仰角主要通过线性平移平台 (Linear translation stage) 来调整。线性平移平台是精确运动系统的一个组成部分，主要负责将物体限制在单个运动轴上运动。线性平移平台通过杠杆臂严密地连接到望远镜的中心框架上。杠杆臂轻微的预加负荷可使俯仰角调整的迟滞最小化。在早期设计阶段，考虑了包括转矩电机等几种俯仰角驱动模式，最后选择线性平移平台是因为它可以高精度地调节俯仰角，并能够在望远镜中心框架上不对称地加载负荷。由于可以高精度地调节俯仰角，线性平移平台驱动模式还可以作为望远镜发射和着陆时的锁死装置。

用于细调方位角的探测器固定在吊舱工作台顶部。作为定位望远镜的方位角的中级分辨率器件(Precision Azimuth Sun Sensor, PASS)，它捕获方位角范围为 ±3 °。而用来定位望远镜俯仰角的中级分辨率器件(Full Range Elevation Detector, FRED)，则可以在方位角为 ±5 °的范围内、俯仰角在±15 °范围内搜寻太阳。当太阳所处位置超过这个范围，全程高度仪(FRED)会给出一个饱和信号，表示太阳在当前望远镜的最大俯仰角之上或之下。这两个探测器的精度都高于 10"。最高精度地跟踪太阳是由安装在望远镜的前环上的洛克希德中级分辨率太阳探测器负责完成的。它的方位角和俯仰角调节范围均为 ±3 °。当温度稳定且处于最低水平时，洛克希德中级分辨率太阳探测器对太阳的指向精度可高达 1-2"。

2 飞行

“日出”球载任务的第一次飞行是 2009 年 06 月 08 日 06:27 UT 从瑞典北部的柯茹纳(Kiruna)放飞至 37.2 公里高空，于 2009 年 06 月 13 日 23:47 UT 降落在加拿大北部岛屿上。第二次飞行是 2013 年 06 月 12 日 05:37:53 UT 从瑞典北部的柯茹纳放飞至 37.1 公里高空，于 2013 年 06 月 17 日 11:49:24 UT 降落在加拿大北部岛屿上。在飞行过程中，吊舱工作台的指向系统首先开始运行。球载装置在上升期间，开启了旋转模式。这种模式可以

使得球载装置中的仪器得到光照和加热。这样，指向系统就可以在不同条件下调试参数。指向系统参数调试结束之后，吊舱工作台的指向系统在观测过程中能够非常稳定地指向太阳。

在热控制方面，所有仪器的温度都控制在正常范围内。例如，在焦后仪器平台上的光学器件和机械的温度保持在 5℃－25℃之间。一些外部元件的温度变化范围在 ±10℃ 之间。导致这个温度发生变化的主要原因是望远镜的俯仰角变化和球载装置因地面地形变化而导致的仪器上接收到的反照率通量(Albedo Flux) 的变化。反照率是指物体反射出来的太阳辐射强度与该物体表面接收太阳总辐射强度之比。

光学性能的好坏可以通过相关波前探测器测量到的波前质量(Wavefront Quality)、相位差和重建后的数据三个因素进行评价。在观测时，影响光学性能的主要因素是波前误差。而波前误差主要是由于白天光照下光学系统的受热弹性形变，以及光学系统朝向相对于重力方向发生的变化导致主镜和副镜相对位置的轻微变化而产生的。这种波前误差可以用相关波前探测器进行测量，根据测量结果来调整副镜的位置以减小波前误差。在飞行过程中，只是在闭环时对副镜位置进行了微调(100 微米)从而调整了焦点位置。而调整之前，这种轻微的离焦导致的波前误差为 ±0.5λ rms。相关波前探测器的灵敏度和副镜微调的精确度使得光路聚焦精度误差低于 0.01λ rms[22]。相关波前探测器焦点位置和单色光成像仪的焦点对齐误差、相关波前探测器焦点和磁像仪焦点的对齐误差均在 $\lambda/20$ 范围内。不过，在后期数据处理时发现，观测期间主要影响光学性能的并不是波前误差和仪器中的光学器件，而是残留的图像模糊(residual image smear)造成的。图像模糊主要是由于运动图像的多帧叠加造成的，这导致了单色光成像仪观测数据空间分辨率降低到 0.1"，磁像仪观测数据的空间分辨率降低到 0.15"－0.18"。

3 观测数据

“日出”球载任务的两次飞行都获取到了优质的数据。第一次飞行观测目标主要集中在日面中心的宁静区,第二次飞行观测主要集中在活动区。第一次飞行任务观测的数据主要分布在 2009 年 06 月 09 日、11 日和 13 日三天时间里。其中包括波段 2,140 Å， 3,000 Å，3,120 Å，3,880 Å，3,968 Å 的单色光成像仪多波段数据和波段 5250.2 Å 的偏振数据。总的观测时间为 130 个小时。单色光成像持续观测的最长时间段为 34 分钟，在波长最短的 2,140 Å 处获得了 19 分钟的观测数据，偏振观测最长持续时间是 32 分钟。

图 7 展示单色光成像仪多波段观测数据重建后的单色像。第一排为日面中心宁静区(μ = 0.72)的观测特征，其中在 3,000 Å，3,120 Å，3,880 Å 等波段处，观测结果均展示出清晰的亮米粒结构以及位于暗的米粒通道里的光球亮点。在 2,140 Å 波段对应的图像上，亮米粒边界没有之前在三个波段观测到的边界清晰，暗的米粒通道也不再清晰可见。图 7a 中最左边的子图展示了在 Ca II H 3,968 Å 波段观测到的日面中心宁静区附近的特征，可以清晰观测到暗米粒和亮的米粒通道结构。这与光球波段观测到的亮米粒和暗米粒通道的现象完全相反。而在 2,140 Å 波段观测到的特征则是介于反转米粒和正常米粒之间的状态。图 7b 为日面边缘的观测特征。针状体在日面边缘之上很明显地被观测到。

图 8 为偏振数据重建图。第一排分别为连续谱图(左)、多普勒速度图(右)。第二排分别是总的纯线偏振强度与连续谱图视场内辐射强度 I_c 的平均值之比、以及圆偏振强度与 I_c 的平均值之比，它们的定义分别如下：

$$L_s = \frac{1}{4\langle I_c \rangle}\sum_{i=1}^{4}\sqrt{Q_i^2 + U_i^2}, V_s = \frac{1}{4\langle I_c \rangle}\sum_{i=1}^{4}\alpha_i V_i \,, \tag{1}$$

这里, i = 1, 2, 3, 4 为谱线 Fe 线心附近的几个波长点，α_i = 1, 1, –1, –1。与这几个物理量有关的参数中除了 L_s 之外都是重建得到的数据。在接近连续谱的波长 5250.2 Å+227 mÅ 附近的观测结果显示米粒的亮度对比度的均方根为 13.5%。这标志着获取到了高质量的偏振图像。在图 8 右下角的 V_s 轮廓图中间的一块区域有较强的斯托克斯 V 偏振信号，这是一个网络区域(network region)。从图中可以看出，除了部分强磁场的网络区域，其余大部分区域都是网络内区域，其对应的磁场为混合极性磁场。根据斯托克斯 V 偏振信号得到的这些网络内磁元的尺度小于 1"，而很多磁元的尺度接近望远镜的衍射极限(0.15")。

SUNRISE 第二次球载任务一共观测了 122 个小时，单色光成像仪获取了 300 GB 的数据(60,806 幅图)，而磁像仪获取了 68 GB 的数据量(48,129 幅图)。单色光成像仪的连续观测时间最长为 60 分钟，而磁像仪的连续观测时间最长为 17 分钟。观测数据的像素分辨率根据波段的不同而有所变化，不过均在每像素 0.01983"– 0.02069"的范围内。磁像仪同样采用了多种观测模式，不过主要观测模式为在谱线 Fe I 5250.2 Å 线心两侧一共取 8 个波长点(与线心距离分别为 ±120 mÅ, ±80 mÅ, ±40 mÅ, +227 mÅ) 处分别进行全斯托克斯参数的观测。观测数据时间分辨率为 36.5 秒，像素分辨率为 0.05546" , 视场大小为 51"×51"。

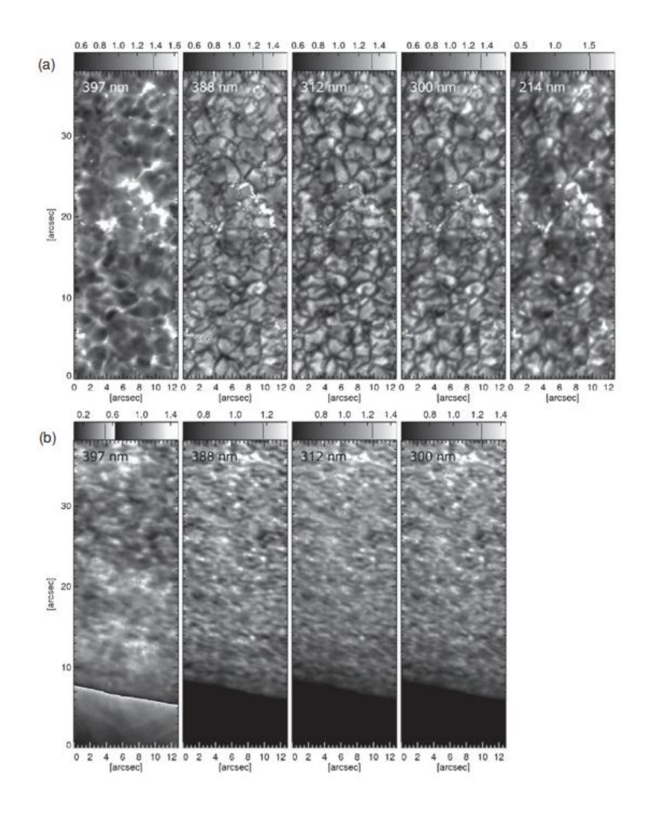


图 7 (a)自左向右显示的是日面中心宁静区在波段 3,968 Å, 3880 Å, 3,120 Å, 3,000Å, 2,140 Å 的单色像。(b)自左向右显示的分别日面边缘在 3,968 Å, 3,880 Å, 3,120 Å, 3,000 Å 的单色像。

Fig 7 (a) Panels from left to right: filtergrams at 3,968 Å, 3,880 Å, 3,120 Å, 3,000 Å, 2,140 Å in a quiet region near disk center. (b) Filtergrams at 3,968 Å, 3,880 Å, 3,120 Å, 3,000 Å near solar limb from left to right, respectively.

图 9 和图 10 分别展示了“日出”球载任务第二次飞行获得的观测数据经重建后得到的单色光和斯托克斯参数强度图。图 9(a) 为波长 3,000 Å 处的单色像，其强度已根据 I_{QS} 做了归一化。这里的 I_{QS} 指的是在波长 3,000 Å 处观测到的宁静区平均亮度。图中可以很清晰地辨别出光球亮点、光斑、被拉长的米粒等细节特征。图 9(b) 和 9(c) 为透过带线心(3,968Å)相同而透过带宽不同的观测结果。尽管透过带宽不同，这两幅图展示的特征几乎一

致。由于是在活动区附近进行观测，在位于低色球的 Ca II H 3968Å 波段上得到的图像展示出清晰的细纤维结构，而且它们的足点与图 9a 中的亮点位置相对应。

图 10a–10c 分别展示了距离谱线 Fe I 5250.2 Å 线心 +227 mÅ，+0 mÅ，+40 mÅ 处所观测到的活动区特征；图 10d–10f 则分别展示了在波长 Fe I 5250.2Å +40 mÅ 处得到的斯托克斯参数 Q, U, V 对 I_{QS} 归一化后的强度分布图。图中可以辨别出活动区特别是黑子内部的细节和特征。这当中包括气孔，被拉伸的米粒，黑子内部的本影，亮桥，少许半影结构以及本影亮点等特征(见图 10a–10c)。在图 10a 中，米粒和本影亮点轮廓非常清晰，而与本影亮点相对应的则是图 10f 中在相同位置处增强的斯托克斯 V 信号。这意味着本影亮点处汇聚着较强的纵向磁场。而在本影亮点的周围则没有这么强的斯托克斯 V 信号。这也意味着在黑子本影中的磁场并不均匀，存在有很多尺度更小，包含较强磁场的磁通量管。

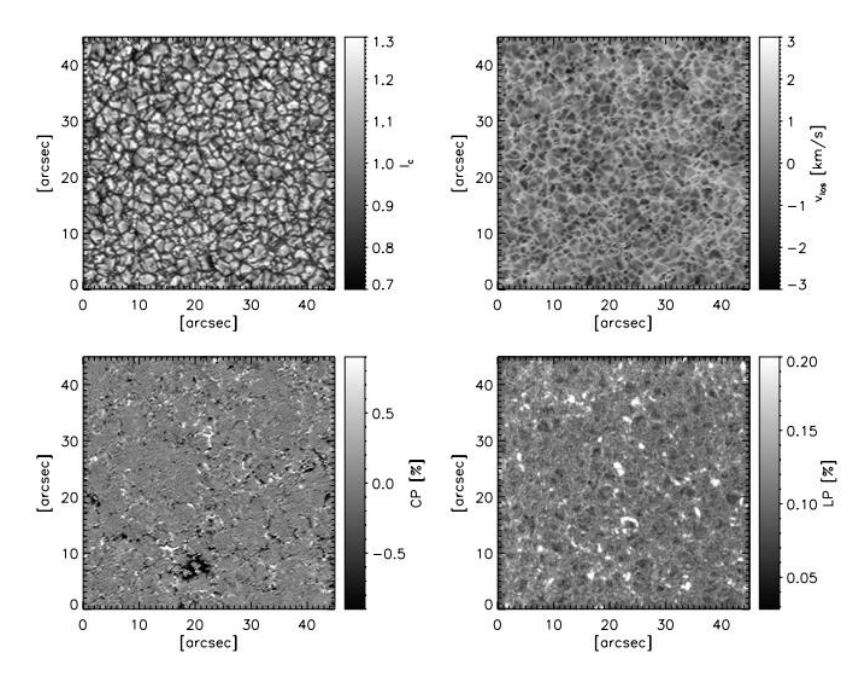


图 8 偏振观测数据反演图[15]。第一排子图分别为连续谱图和多普勒速度图。第二排分别是 L_s 和 V_s 轮廓图（见方程 1）。

Fig 8 IMaX data. The top panels are continuum image and the Doppler velocity contour, respectively[15]. The bottom panels are the contours of L_s and V_s defined in equation (1), respectively.

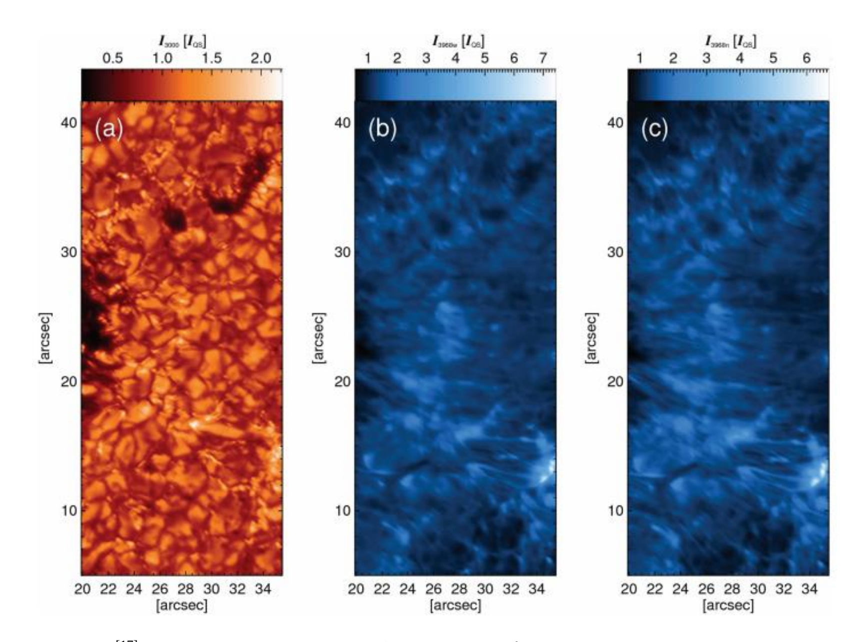


图 9 在不同波段得到的单色像[17]，相应的辐射强度已根据宁静太阳在 3,000 Å 处的辐射强度 I_{QS} 做了归一化。(a) 在波段 3,000 Å 处的单色像。(b)、(c) 中心波长为 3,968 Å 透过带宽分别为 1.8Å 和 1.1 Å 的单色像。

Fig 9 Filtergrams at various wavelengths[17]. (a) Filtergram at the wavelength of 3,000Å, (b) and (c) filtergrams at the central wavelength of 3,968 Å with passbands of 1.8 Å and 1.1 Å, respectively. The intensity of all the images are normalized to $I_{QS,}$ the intensity of the quiet Sun at wavelength of 3,000 Å.

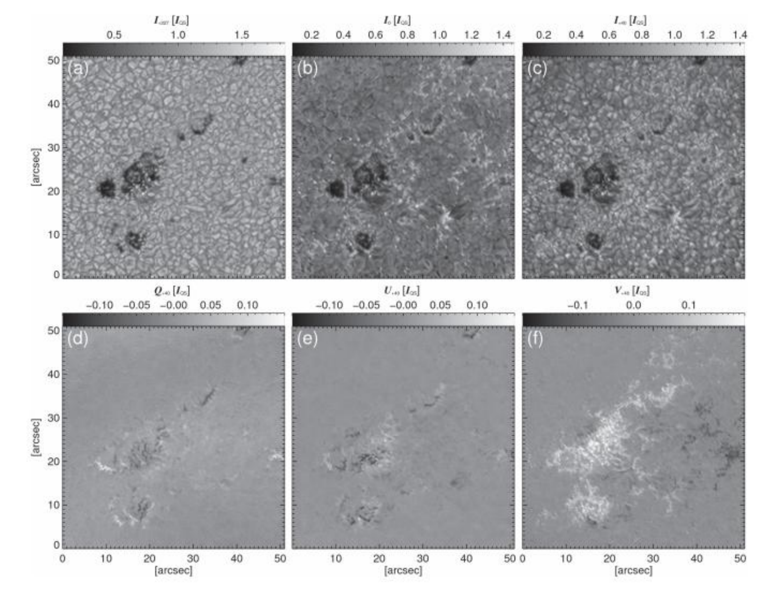


图 10 在谱线 Fe I 5250.2 Å 线心附近的单色像和斯托克斯参数强度图[17]。(a) 在距离 Fe I 5250.2Å 线心 +227 mÅ 处的单色像，(b) 在谱线 Fe I 5250.2 Å 线心处的单色像，（c）在距离谱线 Fe I 5250.2 Å 线心 +40 mÅ 处的单色像，(d–f)分别为斯托克斯参数(Q, U, V)在距离谱线 Fe I 5250.2 Å 线心 +4 0mÅ 处的强度分布图。所有强度值都相对于 I_{QS} 做了归一化。

Fig 10 Filtergrams and Stokes I, Q, U, and V around the center of the spectral line Fe I 5250.2 Å[17]. (a-c) Filtergrams at wavelengths +227 mÅ, +0 mÅ，+40 mÅ apart from the Fe I 5250.2 Å line center, respectively. (d-f) the Stokes Q, U, and V contours at +40 mÅ apart from the Fe I 5250.2 Å line center. The intensity in all the images has been normalized to I_{QS}.

4 科研成果

"日出"第一次飞行任务的观测目标主要集中在日面中心的宁静区。观测任务获得的科学成果主要集中在小尺度磁场的浮现、磁通量管与米粒之间的相互作用、磁通量管的位形和特征以及波的传播等方面。获得了多项新的、目前地基望远镜难以探测到的观测结果。比如，他们利用这次球载任务获得的数据首次观测到了磁通量管、首次观测到了磁通量管与米粒之间的相互作用、首次通过多波段观测确定了日面中心宁静区的磁通量管从光球到色球的倾斜角度、首次观测到随着米粒元胞一起浮现的小磁元所伴随的强蓝移信号。最后这个发现被他们解释为光球磁重联的结果。第二次飞行任务的观测目标主要集中在日面中心附近的活动区，所获得的科研成果主要集中在活动区附近的磁浮现、磁对消、移动磁特征、活动区附近强磁场延伸到色球层形成的细纤维结构等。

两次飞行任务均获得了高质量的数据和丰硕的科研成果。现将截止到目前为止根据两次飞行任务取得的数据所获得的重要成果作一个概述。第一次飞行任务的观测目标是日面中心附近的宁静区，以对流运动和小尺度磁场活动为主。观测目标主要有米粒、位于米粒通道内的亮点、发生在米粒通道里的涡旋运动，以及位于米粒元胞上的小磁元的浮现活动等。它们的主要特点是尺度小，寿命短，对观测设备的空间和时间分辨率要求极高。我们下面首先介绍根据第一次飞行过程中获得的数据所取得的研究成果：

- 首次利用高分辨手段观测到千高斯磁场强度的磁通量管。Lagg 等人[25]对"日出"球载任务观测到的斯托克斯数据进行了反演。偏振数据的空间分辨率高达 0.15"–0.18"。通过选取三个磁场强度分别为 100 G，500 G，1000 G 的区域，分析它们在光球层底层、中层和高层的温度分布，他们发现千高斯的磁场区域随着高度增加，其温度会逐渐超过周围环境的温度，而另外两个弱磁场区域则没有明显的温度变化。他们由此认为该网络区域是由一个包含千高斯强度的磁通量管组成的强磁场区域。 Jafarzadeh 等人[26]构建了细磁通量管的三维磁场位形并计算出细磁通量管从光球层延伸到低色球层发生膨胀和倾斜后与其最初延伸方向所形成的角度平均为 14°± 6°。Stangalini 等人[27]发现磁通量管的水平移动速度和其内部由此而产生的纵向扰动速度有 90° 的相位延迟，暗示了磁通量管小尺度的水平移动可以在其内部产生纵波。
- 首次发现紫外波段亮点的亮度对比度高达 2.31。Riethmüller 等人[28]研究了在紫外波段和可见光波段观测到的亮点的亮度对比度，从而考察了亮点对太阳辐照的贡献。他们发现亮点在紫外波段 2,140 Å 处观测到的亮点的平均亮度对比度高达 2.31，而在其它波段处观测到的亮度对比度依照观测波段(3,000 Å, 3,120 Å, 3,880 Å, 3,968 Å, 5,250 Å)顺序分别为 1.52, 1.35, 1.60, 1.89, 1.11。Hirzberger 等人[29]则发现太阳宁静区在紫外波段 2140 Å 处的亮度对比度比其他波段观测的都高，达到了 32.8%。 利用同样的数据，Kahil[30]研究了视向磁场强度与在不同波段上辐射强度的关系，发现不同波段的辐射强度与对应的磁场强度服从不同的对数函数关系。
- 发现随米粒一起浮现的小尺度磁元以及伴随该磁元浮现的超声速蓝移现象。Borrero 等人[31,32]研究了米粒元胞内部的偏振信号，发现一个米粒元胞中有超声速的蓝移偏振信号。米粒元胞的浮现率为 1.3×10^{5} $\mathrm{arcsec^{-2}s^{-1}}$，面积约 0.046 $\mathrm{arcsec^2}$, 持续时间为 80 秒。另外，这些以超声速运动的偏振信号在随米粒浮现的同时，也伴随着相反磁极偏振信号的浮现。他们进一步发现这些事件发生时往往伴随有相反极性磁场的出现以及谱线蓝移和红移的出现。由此他们推断这很有可能是极性相反的磁场发生了磁重联[33]。Palacios 等人[34]研究了一个磁场伴随着米粒浮现的事例。这个新浮现的磁场刚开始有约 100 高斯的强度并占据了米粒的顶端，然后随着米粒的分裂而分裂。在这之后一个相反极性的磁场也浮现出来，二者汇聚在米粒通道里。Requerey 等人[35]发现对流运动中，等离子体下沉区域的密度为 $6.7\times10^{-2}\mathrm{Mm^{-2}}$。该区域往往出现在中米粒边界交汇处，且伴随强的纵向磁场。通过事例分析发现等离子体下沉区域约 40% 的面积存在纵场强度高于 500 高斯的磁场结构。Steiner 等人[36]发现米粒边缘

发亮，而且发亮的结构从米粒边缘向米粒中心移动。发亮的结构离开米粒边缘后，米粒边缘变暗，暗的结构随着发亮的结构做同样的移动。他们用数值模拟发现这种现象是米粒间隙中扭缠的磁通量管与米粒的碰撞造成的。

● 研究并更新了有关米粒通道里的涡旋运动数密度的结论。Bonet 等人[37]发现涡旋运动数密度为 3.1×10^{-3} Mm^{-2} min^{-1}。SUNRISE 获得的高空间分辨偏振和成像数据使得检测到的涡旋运动数量是之前用其它观测设备得到结果的 1.7 倍。他们观测到的涡旋运动持续了 7.9 ± 3.2 分钟，并且还发现在同一个位置会发生好几次涡旋运动；同时这些涡旋运动一部分是顺时针旋转的，另一部分则是逆时针旋转的。

● 研究了线偏振信号强的区域与横向磁场的关系。Danilovic 等人[38]选取了线偏振信号很强的区域并对它们进行了跟踪，发现这些线偏振信号强的区域中横场出现的频率密度为 7×10^{-4} $arcsec^{-2}s^{-1}$，是之前其它观测获得的结果的 1–2 倍[39–42]。这些强的线偏振信号的寿命和面积没有明显的规律，且往往出现在米粒边缘。它们中大多数都有红移现象。只有个别的在其整个寿命中都只有蓝移现象。Kianfar 等人[43]进一步研究了宁静太阳的线偏振特征(Linear polarization features)。当信噪比高于 4.5 时，整个研究区域的 26% 都覆盖有线偏振信号，且线偏振区域占研究区域面积的 10%。它们出现的频率密度为 8×10^{-4} $arcsec^{-2}s^{-1}$，尺度约为 0.1"–1.5"，寿命在 30 秒至 300 秒之间，磁场强度约几百高斯，水平移动速度约为 1.2 km/s。这些线偏振区域在红移和蓝移区均匀地分布，且其亮度对比度比其周围没有线偏振特征的区域高。Quintero Noda 等人[44]发现多普勒速度变得很强之前约 84±11 s 能够观测到线偏振信号。大约 80% 的强多普勒信号出现在新浮现磁场与已存在磁场之间的中性线附近。他们认为这种强的多普勒信号是新浮现磁场和已存在磁场之间磁重联的结果。不过，另外 20% 则并没有表现出与已存在磁场很靠近的特征。他们认为这 20% 强多普勒信号所在区域的磁场结构可能没有明显的几何分布特征。

● 发现磁扩散导致磁通量以指数曲线的规律衰退。Guglielmino 等人[45, 46]分析了一个偶极磁元从浮现到消失的过程并计算出偶极磁元拥有的磁通量为 6×10^{17} Mx，浮现率为 2.6×10^{15} Mx/s。在偶极磁元演化过程中，偶极磁元的偶极轴(偶极磁元之间的连线)方位角发生 90°的变化。他们认为该偶极磁元存在一定程度上的缠绕(writhe)。在偶极磁元衰退期间，它们的足点一方面分裂成更小的磁元并与其周围的磁场发生磁对消，另一方面发生磁扩散加速其衰退。他们发现磁扩散导致磁通量以指数规律衰减，并且计算出的扩散系数(8×10^2 km^2/s)与磁通量输运模型中的大尺度磁扩散的扩散系数一致。Martínez González 等人[47]发现圆偏振数据获取的磁结构的形状有周期性形变的特征。他们注意到磁通量稳定的磁结构的面积振荡周期和米粒寿命相当，并推断这种振荡是米粒对流运动对它的挤压造成的。他们还发现在一个米粒附近的三个磁结构有着同相位的振荡，这意味着它们振荡可以发生干涉使振幅增加到 1,600 公里。

● 研究了磁场结构在太阳大气不同高度上的能量释放过程并认为能量释放主要发生在低层大气中。Chitta 等人[48]利用 SDO/HMI 和 Sunrise/IMaX 的磁图为边界条件，模拟了磁场结构及其演化并研究了能量释放过程。他们发现能量的释放主要发生在高度低于 2,000 km 的低层大气层中。因此，他们认为色球磁场或许在日冕加热问题上扮演着重要角色。

● 研究了宁静区低色球亮点的基本特征。Jafarzadeh 等人[49]计算了这些色球亮点的水平速度、等效直径、强度和寿命等参数，发现色球亮点的平均水平运动速度为 2.2 km/s，等效直径为 0.2"，平均亮度为背景亮度($<I_{Ca}>$)的 1.48 倍，平均寿命为 673 秒。其中 $<I_{Ca}>$ 为 Ca II H 波段观测到的色球宁静区平均亮度。他们估算得到了运动速度达到 15 km/s 的亮点所激发的 kink 波向高层大气传输的功率密度为 310 W/m^2。紧接着，他们又研究了色球亮点的运动类型[50]。他们计算了色球亮点的扩散因子 γ = 1.69 ± 0.08 和扩散系数 D = 257 ± 32 km^2/s。更进一步地，他们利用 SUNRISE 两次飞行的观测数据研究了宁静区和活动区附

近磁结构的水平移动和扩散特征[51]。结果发现，日面中心宁静区、网络内区域和网络区域，活动区附近的网络内区域、网络区域、有磁孔的谱斑区和有黑子的区域这六个区域中的磁结构的扩散因子几乎都大于 1，其中宁静区的网络区域对应的扩散因子为 1。根据运动类型，当 $\gamma = 1$ 时，运动类型为随机运动，当 $\gamma > 1$ 时，为超扩散运动，当 $\gamma <1$ 时为亚扩散运动。因此它们的运动类型几乎都是超扩散运动，只有宁静区的网络区域对应随机运动。 他们认为造成这种超扩散运动类型的原因很可能是周围环境中的米粒对流运动以及米粒通道内部的小尺度扰动。

SUNRISE 的第二次飞行任务主要针对活动区附近**尺度小，演化时间短的磁场结构，比如黑子附近的磁浮现和磁对消、小尺度强磁场结构在活动区上方形成的纤维状结构等。而活动区中如黑子、气孔等强磁场汇聚的区域有尺度大、演化时间长特点的磁场结构，则不是此次主要观测目标和研究对象。**下面我们介绍根据第二次飞行任务的观测数据所获得的科研成果：

- 第一次通过高分辨观测对 Ca II H 波段观测到的细纤维结构特征进行研究。Jafarzadeh 等人[52]通过外推和数值模拟的方法重建了在 Ca II H 波段观测的细纤维结构 (slender Ca II H fibrils) 的磁场位形。他们发现，这些细纤维结构的足点扎根在磁场聚集的区域。而细纤维的顶端与数值模拟中的小尺度磁环的位置相重叠。Gafeira 等人[53]统计研究了 38 个这种细纤维结构，发现他们的平均宽度为 180 公里，长度为 500－4,000 km，平均寿命约为 2,000 s (约 33 min)。Jafarzadeh 等人[54]发现这些细纤维结构有着速度大小为 2.4 ±0.8 km/s，周期为 83 ±29 s 的横向振荡。这些振荡向上传播的相速度为 9 ±14 km/s，传播的能量约为 15 kW/m ^{2}。Gafeira 等人[55]也对细纤维结构在宽度和亮度上的扰动进行了研究。他们发现细纤维结构的宽度扰动和亮度扰动的周期分别为 32 ±17 s 和 36 ±25 s, 对应的传播速度分别为 11 km/s 和 15 km/s。他们认为宽度和亮度的扰动很可能是快腊肠模波传播造成的。
- 第一次通过高分辨观测获得磁结构多波段振荡和运动特征。Jafarzadeh 等人[56]对在波长为 3,000 Å 的连续谱和波长为 3968 Å 的 Ca II H 谱线上同时间共空间观测到的磁结构振荡过程进行了分析。这个磁结构通过亮点来示踪。他们发现位于光球层的亮点和在低色球层与之对应的磁结构的振荡相位差揭示有沿着该亮点所在磁通量管向上传播的高频振荡(频率高达 30 MHz)。他们也观测到了向下传播的振荡和驻波。通过估算，他们得出在两个波段上的磁结构的高度差约为 450 ± 100 km，并进一步估算出沿着该磁结构所在的磁通量管传播的横波和纵波的相速度分别为 29 ±2 km/s 和 31 ±2 km/s。
- 更精确地外推出活动区光球到色球中层之间的三维磁场结构。Wiegelmann 等人[57]利用球载太阳望远镜第二次飞行观测的磁场数据作为磁静态模型的边界条件外推出活动区光球到色球中层之间的三维磁场结构。得益于偏振观测数据非常高的信噪比，他们通过偏振测量获取的横向磁场数据来确定线性磁静态模型(Linear Magneto-static model) 中的自由参数。偏振观测的高空间分辨率允许他们获取光球到色球中层之间大气的非无力场磁场模型。
- 研究了磁浮现过程。Smitha 等人[58]计算了磁浮现率(Flux Emergence Rate, FER)。他们跟踪磁通量在 10^{15}－10^{18} Mx 之间的磁浮现过程，发现这些磁浮现发生的频率为 1,100 Mx cm^{-2} d^{-1}，而磁通量小于 10^{16} Mx 的单次磁浮现对增加太阳大气磁通量的贡献最大。Centeno 等人[59]研究了活动区的一个偶极磁浮现事件。当通过偏振数据发现该磁浮现时，位于其上空的低色球层有对应的磁场结构伸展开来。这个过程展示了磁浮现过程中磁场与其周围的米粒相互作用的细节，展示了将光球层等离子体拖拽到其上方的磁场结构通道的过程。磁场结构上的等离子体形成一个物质流通道，等离子体沿着通道下落到磁场结构足点。位于磁场结构上的等离子体由于重力的原因将磁场结构位形固定。而磁场结构在不停地振荡。最后，磁重联导致磁场结构发生变化，使得磁场结构的一部分得以延伸至高层大气层中，这个过程释放的能量加热了暗条物质、并使其发亮。

- 研究了磁对消现象。Chitta 等人[60]通过将日出球载任务第二次飞行获得的磁场数据与 SDO 同时刻获得的数据相结合，研究发现冕环常常扎根在光球层中偶极磁场较明显的区域，并且该区域中的小尺度磁场不断地发生磁对消。在磁对消过程中，他们还发现在低色球层出现倒 Y-型喷流。由此，他们进一步推论发生在太阳低层大气层的磁对消或磁重联很可能是日冕层中物质和能量的重要贡献者，这些磁环一般都扎根在具有混合磁场极性的区域当中。Kaithakkal 等人[61]研究了活动区附近的 11 个磁对消事件。他们发现这 11 个事件过程中的磁通量衰变率在 3.3×10^{15} – 0.24×10^{15} Mx/s 之间。他们进一步将这 11 个事件分为两类：一类是已经存在的磁场结构与新浮现的磁场结构之间的对消，另一类是两个均已经存在光球表面的磁场结构之间的对消。一共有 6 个事件属于第一个类型，5 个事件属于第二种类型。对于第一种类型，对消过程中多普勒速度先产生蓝移，后变为红移。第二种类型则一直是红移。他们认为，对消事件有可能是部分磁场沉没或者磁重联导致的磁场沉没。
- 研究了出现在气孔附近的运动磁特征(Moving Magnetic Features, MMFs)。Kaithakkal 等人[62]研究了一个气孔附近的 MMFs，发现它们的尺度都在亚角秒水平，并且都在远离气孔；与气孔极性相同的 MMFs 的远离速度为 1.3 km/s，而与之极性相反的 MMFs 的远离速度为 1.2 km/s。他们由此认为与气孔极性相同的 MMFs 以更快的水平速度远离气孔。他们进一步发现，与气孔极性相同的 MMFs 并没有表现出明显的红移或者蓝移，而与之极性相反的 MMFs 则有明显的蓝移。
- Danilovic 等人[63]对比研究了在 Mg II k 和 Ca II H 两个波段观测到的活动区的异同。两个波段对应的透过带宽度分别为 4.8 Å 和 1.1 Å。当活动区以及在活动区上空发生耀斑时，在这两个波段观测到的特征都很相似。不过， Mg II k 波段获取的观测数据在亮度对比度上比 Ca II H 的高 1.4 – 1.7 倍，并且观测的图像更模糊和平滑。尽管 Mg II k 的曝光时间更长一些（是 Ca II H 曝光时间的 100 倍），但这并不能作为二者观测特征亮度对比度存在差异的唯一解释。亮度对比度差异的原因还在于两条谱线不同的形成高度。
- Danilovic 等人[64]将第二次飞行观测到的埃勒曼炸弹与数值模拟的结果进行了对比分析。数值模拟揭示了该事件发生时的复杂物理过程以及观测对这些物理过程和现象反映的局限性。也就是仅凭这些观测还不能够确定磁重联发生的具体高度。

通过分析研究 SUNRISE 两次飞行任务所得到的观测数据，一共获得 24 项科学成果。在这些成果中，第一次飞行任务的研究成果主要涉及对小尺度磁场结构的考察，第二次飞行任务的成果主要集中在对活动区附近的磁场结构的研究方面，比如，磁浮现和磁对消，活动区磁场结构，低色球层的细纤维结构等。这些研究成果的意义表现在技术发展和基础研究两个方面。在观测技术发展方面，这些成果可帮助确定考察太阳低层大气小尺度磁场结构所需要的空间和时间分辨率，还可为今后更大口径太阳光学望远镜的研制和相应科学目标的制定提供重要参考；而在科学研究方面，这些成果可为深入研究在太阳低层大气小尺度磁场的基本特征、磁浮现、磁对消、对流运动与小尺度磁场之间的相互作用、波的激发和传播、太阳大气辐射特征等提供丰富的信息，也可为解决太阳低层大气能量转换和传输以及太阳磁场的起源等重要科学问题提供观测依据。

5 总结与展望

SUNRISE 的仪器装置复杂且精度极高。它主要有以下几个突出特点：

1、大口径望远镜装置。装载 1 米口径的光学望远镜的球载任务在历史上尚属首次。在距离地面 37 公里高的平流层，望远镜的观测不受地面大气的影响，因而几乎完全没有因视宁度起伏带来的的干扰。大口径望远镜能够在接近衍射极限水平的情况下开展高分辨多波段观测，而且能够在近紫外波段进行高分辨观测。这是当前地面大口径望远镜不可企及的优势，

SUNRISE 也因此获取了目前国际上在太阳低层大气高分辨多波段观测方面最优秀的观测资料。

2、优异的光学性能。SUNRISE 有着复杂的光学路径。为了同时满足多波段成像观测、偏振成像观测和光谱观测以及高精度跟踪等不同要求，球载装置中的稳像和光分配系统通过摆镜来稳定光束，通过分束器将不同波段精确地分配到相应的光学出口并满足对应光学接口的光学要求。波前改正系统通过测量波前变形的程度并将测量结果提供给稳像系统，使得摆镜可高精度抵消光路抖动、从而保证光路的高度稳定。

3、高精度跟踪太阳的能力。对太阳的跟踪采用了粗调和细调方位角探测器相结合来确定太阳的方位角并将太阳方位角精度保持在 ±3 °范围内。全程高度仪可以在方位角为±5 °范围内确定太阳的俯仰角并将俯仰角精度保持在 ±3 °范围内。当对方位角和俯仰角的定位精度都保持在 ±3 ° 时，洛克希德中等辨率太阳探测器进一步将方位角和俯仰角的精度定位到 1"–2"。最后通过稳像系统稳定光束。光束稳定精度可高达 0.04" (rms)。

4、持续稳定的热控制能力。球载装置从地面飞到平流层、从夜晚无光照到白天暴露在太阳下，其所承受的热辐射是不同的。光学器件在受到不同强度的辐射后很容易发生损坏和变形，进而导致仪器和光路对准精度下降或者对不准。因此，保证球载装置中的仪器能够在持续稳定的温度下工作非常重要。焦后仪器平台的热控制要求在任何情况下都能够将温度稳定在 20 ± 10 °的范围内。在观测的时候，对望远镜主镜周围的热控制非常重要。位于第一焦点处的楔形表面的涂层可以反射掉来自主镜 99 %的辐射，并通过光阑将第一焦点附近接收到的辐射功率控制在 10 瓦左右。位于主镜后环的三个档热板负责反射来自于地面的反射光从而保护主镜。

5、高刚度、低重量、低膨胀系数的支撑材料。负责连接望远镜主镜和副镜以及焦后仪器平台的材料、封装焦后仪器平台的各种板材均具有刚度高，重量轻，膨胀度低的特点。这能够保证这些框架在不同的重力负荷环境下、不同的热环境下均不发生变形。其重量低的特点也减轻了球载装置的负重压力。

6、高分辨偏振/光谱观测能力。位于焦后仪器平台的磁像仪装置利用快偏振模式，即通过使用两个液晶相位可变延迟器，使用图像叠加和双光束偏振相结合的办法使得偏振灵敏度达到 0.1%。重建后的偏振数据空间分辨率为 0.15"–0.18"，磁场纵向分量测量精度可达 4 G，横向分量测量精度可达 80 G。获取的视向速度值的误差范围为 5－40 m/s。在光谱观测方面，通过使用一个窄带前置滤光器和一个双通道 F-P 干涉仪使得光谱分辨率高达 85 mÅ。

7、高分辨成像能力。观测波长越短，望远镜获取的光强度越弱。而且，短波段特别是紫外波段的光很容易被污染。为了获取紫外波段的高分辨成像观测，在经过光分配系统将特定波段的光分配到成像仪装置中之后，入射光须经过两个滤波轮以排除特定观测波段以外的杂散光。通过两个过滤轮之后，在落到 CCD 上成像之前的光路被封装在一个管道里以防止紫外光被其它光线污染和被噪声淹没。这样，多波段成像观测均可以获取到衍射极限水平的空间分辨率。

SUNRISE 球载任务的两次科学观测获得的科研成果同样是非常显著的。两次的科研成果分别集中在日面中心宁静区小尺度磁场的研究和日面中心活动区小尺度磁场以及磁场结构的研究上。这些研究成果凸显了一个重要的问题，就是对日冕加热、磁场起源等基本物理问题的解决要求更大口径的太阳光学望远镜，以及要求优秀的视宁度甚至无视宁度环境的优质观测条件。SUNRISE 球载太阳望远镜的两次飞行无疑是成功的,也是非常具有借鉴意义的。目前为止，我国在球载太阳望远镜和空间太阳望远镜方面仍然是空白。我国发展球载太阳望远镜的必要性和迫切性是非常明显的。这不仅是太阳物理发展的需要,也是我国太阳物理研究所处国际地位的客观要求。另外，通过球载太阳望远镜高分辨观测，可为更进一步解决日

冕加热问题、探索太阳爆发活动的物理本质和规律打下基础，也为我国未来星载望远镜的发展提供参考和借鉴。

2018 年上半年，中国科学院启动了“临近空间科学实验系统”项目，又简称“鸿鹄专项”。“鸿鹄专项”将“研制重载浮空器、持久驻空超压浮空器、可复用动力浮空器、球载临近空间太阳能无人机系统、临近空间中高层科学探测平台等 3 类 5 型实验平台”。“通过建成我国首个临近空间科学实验系统，旨在深度刻画临近空间天气，电磁环境，辐射环境，探查临近空间生物多样性，解释临近空间关键环境要素的生物效应，开展临近空间科学研究等”。该项目于 2019 年 05 月 13 – 6 月 7 日成功完成了生物大气载荷综合验证试验中的飞行平台、各科学载荷、预设轨迹等所有飞行操作和试验科目。2019 年 07 月 至 8 月，“鸿鹄专项”完成了首次飞行实验。这恰好是发展我国球载太阳望远镜一个很好的契机。

中国科学院云南天文台承担“鸿鹄专项”中的“日冕仪临近空间搭载实验”子课题的研究任务，将结合日冕仪和球载太阳望远镜的优势、针对下列目标开展观测研究：

(1) 大尺度的日冕物质抛射结构和传播过程；

(2) 观测太阳边缘日冕中电流片的精细结构，检验和改进已有的太阳爆发模型；

(3) 利用近紫外谱线 Mg II k 2796 Å 和 Mg II h 2803 Å 对太阳高色球的辐射检测，开展对太阳爆发过程和太阳低层大气磁重联等重要活动的诊断。从光学波段到射电波段对太阳活动的观测和监视，球载太阳望远镜还有很大的发展空间。本文旨在为我国球载太阳望远镜的发展，特别是中国科学院云南天文台承担的“日冕仪临近空间搭载实验”项目提供有价值的参考资料。

参考文献

[1] Schwarzschild, M. , Photographs of the Solar Granulation Taken from the Stratosphere[J], The Astrophysical Journal ,1959 130, 345.

[2] Danielson, R. E. The Structure of Sunspot Penumbras. I. Observations[J], The Astrophysical Journal , 1961, 134, 275.

[3] Mehltretter, J. P. 1976, Der Flug von Spektro-Stratoskop， Sterne und Weltraum[J], 15, 44.

[4] Mehltretter, J. P.Balloon-borne imagery of the solar granulation. II. The lifetime of solar granulation[J], Astronomy & Astrophysics,1978, 62, 311.

[5] Wittmann, A., & Mehltretter, J. P. Balloon-borne imagery of the solar granulation. I. Digital image enhancement and photometric properties[J], Astronomy & Astrophysics,1977, 61, 75.

[6] Krat, V. A., Dulkin, L. Z., Karpinsky, V. N., et al.The third flight of the Soviet stratospheric solar observatory[J]. Astronomicheskij Tsirkulyar, 1970, 597, 1.

[7] Krat, V. A. On the size of the structure elements in the solar chromosphere[J],Solar Physics.,1972, 27, 39.

[8] Krat, V. A., Karpinsky, V. N., & Pravdjuk, L. M. On the Sunspot Structure[J],Solar Physics.,1972, 26, 305.

[9] Rust, D. M., Murphy, G., Strohbehn, K., et al.Balloon-Borne Polarimetry[J], Sol. Phys.,1996, 164, 403.

[10] Bernasconi, P., Rust, D., Murphy, G., et al.High Resolution polarimetry with a Balloon-Borne Telescope: The Flare Genesis Experiment[C]//High Resolution Solar Physics: Theory, Observations, and Techniques, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 1999, 183:279.

[11] Bernasconi, P. N., Rust, D. M., Eaton, H. A., & Murphy, G. A. Proc. Balloon-borne telescope for high-resolution solar imaging and polarimetry[J], SPIE, 2000,4014, 214

[12] Georgoulis, M. K., Rust, D. M., Bernasconi, P. N., et al. Statistics, Morphology, and Energetics of Ellerman Bombs[J], The Astrophysical Journal , 2002, 575, 506.
[13] Herse, M. High resolution photographs of the sun near 200 nm[J],Solar Physics., 1979, 63, 35.
[14] Samain, D., & Lemaire, P. Balloon-Borne Ultraviolet Solar Telescope and High Resolution Echelle Spectrograph - Instrumentation and First Results[J], Ap&SS,1985, 115, 227.
[15] Solanki, S. K., Barthol, P., Danilovic, S., et al. Balloon-borne telescope for high-resolution solar imaging and polarimetry[J], The Astrophysical Journal , 2010, 723, L127.
[16] Solanki, S. K., Barthol, P., Danilovic, S., et al.First Results from the SUNRISE Mission[C]//4th Hinode Science Meeting: Unsolved Problems and Recent Insights, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 2012, 455:143.
[17] Solanki, S. K., Riethmüller, T. L., Barthol, P., et al. The Second Flight of the Sunrise Balloon-borne Solar Observatory: Overview of Instrument Updates, the Flight, the Data, and First Results[J], The Astrophysical Journal Supplement Series, 2017,229, 2.
[18] Barthol, Peter., Katsukawa, Yukio., Lagg, Andreas., et al. Getting Ready for the Third Science Flight of SUNRISE[C], 42nd COSPAR Scientific Assembly, 2018, 42,1
[19] Barthol, P., Gandorfer, A., Solanki, S. K., et al. The Sunrise Mission[J],Solar Physics.,2011, 268, 1
[20] Berkefeld, T., Schmidt, W., Soltau, D., et al. The Wave-Front Correction System for the Sunrise Balloon-Borne Solar Observatory[J],Solar Physics., 2011,268, 103
[21] Gandorfer, A., Grauf, B., Barthol, P., et al.The Filter Imager SuFI and the Image Stabilization and Light Distribution System ISLiD of the Sunrise Balloon-Borne Observatory: Instrument Description[J], Sol. Phys.,2011, 268, 35
[22] Martíez Pillet, V., Del Toro Iniesta, J. C., Álvarez-Herrero, A., et al. The Imaging Magnetograph eXperiment (IMaX) for the Sunrise Balloon-Borne Solar Observatory[J], Sol. Phys.,2011, 268, 57
[23] Martínez Pillet, V., Bonet, J. A., Collados, M. V., et al. The imaging magnetograph eXperiment for the SUNRISE balloon Antarctica project[J], Proc. SPIE, 2004,5487, 1152
[24] Elmore, D. F., Lites, B. W., Tomczyk, S., et al. The Advanced Stokes Polarimeter - A new instrument for solar magnetic field research[C], Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series,1992, 1746, 22
[25] Lagg, A., Solanki, S. K., Riethmüller, T. L., et al. Fully Resolved Quiet-Sun Magnetic flux Tube Observed with the SUNRISE/IMAX Instrument[J], The Astrophysical Journal , 2010, 723, L164
[26] Jafarzadeh, S., Solanki, S. K., Lagg, A., et al. Inclinations of small quiet-Sun magnetic features based on a new geometric approach[J]. Astronomy & Astrophysics,2014, 569, A105
[27] Stangalini, M., Solanki, S. K., & Cameron, R. MHD waves in small magnetic elements: comparing IMaX observations to simulations[J], Mem. Soc. Astron. Italiana,2013 , 84, 444
[28] Riethmüller, T. L., Solanki, S. K., Martínez Pillet, V., et al. Bright Points in the Quiet Sun as Observed in the Visible and Near-UV by the Balloon-borne Observatory SUNRISE[J], The Astrophysical Journal , 2010,723, L169
[29] Hirzberger, J., Feller, A., Riethmüller, T. L., et al.Quiet-sun Intensity Contrasts in the Near-ultraviolet as Measured from SUNRISE[J], The Astrophysical Journal , 2010, 723, L154

[30] Kahil, F., Riethmüller, T. L., & Solanki, S. K. Brightness of Solar Magnetic Elements As a Function of Magnetic Flux at High Spatial Resolution[J], The Astrophysical Journal Supplement Series,2017, 229, 12
[31] Borrero, J. M., Martínez-Pillet, V., Schlichenmaier, R., et al. Supersonic Magnetic Upflows in Granular Cells Observed with SUNRISE/IMAX[J], The Astrophysical Journal , 2010, 723, L144
[32] Borrero, J. M., Pillet, V. M., Schlichenmaier, R., et al.Supersonic Magnetic Flows in the Quiet Sun Observed with SUNRISE/IMaX[C]// 4th Hinode Science Meeting: Unsolved Problems and Recent Insights, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 2012,455,155
[33] Borrero, J. M., Martínez Pillet, V., Schmidt, W., et al. Is Magnetic Reconnection the Cause of Supersonic Upflows in Granular Cells?[J], The Astrophysical Journal , 2013,768, 69
[34] Palacios, J., Blanco Rodríguez, J., Vargas Domínguez, S., et al. Magnetic field emergence in mesogranular-sized exploding granules observed with sunrise/IMaX data[J], Astronomy & Astrophysics,2012, 537, A21
[35] Requerey, I. S., Del Toro Iniesta, J. C., Bellot Rubio, L. R., et al. Convectively Driven Sinks and Magnetic Fields in the Quiet-Sun[J], The Astrophysical Journal Supplement Series, 2017, 229, 14
[36] Steiner, O., Franz, M., Bello González, N., et al. Detection of Vortex Tubes in Solar Granulation from Observations with SUNRISE[J],The Astrophysical Journal ,2010, 723, L180
[37] Bonet, J. A., Márquez, I., Sáchez Almeida, J., et al.SUNRISE/IMaX Observations of Convectively Driven Vortex Flows in the Sun[J], The Astrophysical Journal , 2010, 723, L139
[38] Danilovic, S., Beeck, B., Pietarila, A., et al. Transverse Component of the Magnetic Field in the Solar Photosphere Observed by SUNRISE[J], The Astrophysical Journal , 2010,723, L149
[39] Martíez González, M. J., & Bellot Rubio, L. R.Emergence of Small-scale Magnetic Loops Through the Quiet Solar Atmosphere[J], The Astrophysical Journal , 2009, 700, 1391
[40] Lites, B. W., Leka, K. D., Skumanich, A., et al. Small-Scale Horizontal Magnetic Fields in the Solar Photosphere[J], The Astrophysical Journal , 1996, 460, 1019
[41] Jin, C., Wang, J., & Zhou, G. The Properties of Horizontal Magnetic Elements in Quiet Solar Intranetwork[J], The Astrophysical Journal , 2009, 697, 693
[42] Ishikawa, R., & Tsuneta, S. Comparison of transient horizontal magnetic fields in a plage region and in the quiet Sun[J], Astronomy & Astrophysics, 2009,495, 607
[43] Kianfar, S., Jafarzadeh, S., Mirtorabi, M. T., et al. Linear Polarization Features in the Quiet-Sun Photosphere: Structure and Dynamics[J],Solar Physics., 2018,293, 123
[44] Quintero Noda, C., Martíez Pillet, V., Borrero, J. M., et al. Temporal relation between quiet-Sun transverse fields and the strong flows detected by IMaX/SUNRISE[J], Astronomy & Astrophysics, 2013, 558, A30
[45] Guglielmino, S. L., Pillet, V. M., del Toro Iniesta, J. C., et al. Small-scale flux emergence events observed by Sunrise/IMaX[C]//Advances in Plasma Astrophysics, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium,2011, 274:140
[46] Guglielmino, S. L., Martíez Pillet, V., Bonet, J. A., et al. The Frontier between Small-scale Bipoles and Ephemeral Regions in the Solar Photosphere: Emergence and Decay of an Intermediate-scale Bipole Observed with SUNRISE/IMaX[J], The Astrophysical Journal , 2012, 745, 160

[47] Martíez Gonzáez, M. J., Asensio Ramos, A., Manso Sainz, R., et al.Unnoticed Magnetic Field Oscillations in the Very Quiet Sun Revealed by SUNRISE/IMaX[J], The Astrophysical Journal , 2011, 730, L37
[48] Chitta, L. P., Kariyappa, R., van Ballegooijen, A. A., et al. Nonlinear Force-free Field Modeling of the Solar Magnetic Carpet and Comparison with SDO/HMI and Sunrise/IMaX Observations[J], The Astrophysical Journal ,2014, 793, 112
[49] Jafarzadeh, S., Solanki, S. K., Feller, A., et al. Structure and dynamics of isolated internetwork Ca II H bright points observed by SUNRISE[J], Astronomy & Astrophysics, 2013, 549, A116
[50] Jafarzadeh, S., Cameron, R. H., Solanki, S. K., et al. Migration of Ca II H bright points in the internetwork[J], Astronomy & Astrophysics, 2014, 563, A101
[51] Jafarzadeh, S., Solanki, S. K., Cameron, R. H., et al. Kinematics of Magnetic Bright Features in the Solar Photosphere[J], The Astrophysical Journal Supplement Series, 2017, 229, 8
[52] Jafarzadeh, S., Rutten, R. J., Solanki, S. K., et al. Slender Ca II H Fibrils Mapping Magnetic Fields in the Low Solar Chromosphere[J], The Astrophysical Journal Supplement Series, 2017, 229, 11
[53] Gafeira, R., Lagg, A., Solanki, S. K., et al. Morphological Properties of Slender Ca II H Fibrils Observed by SUNRISE II[J], The Astrophysical Journal Supplement Series, 2017,229, 6
[54] Jafarzadeh, S., Solanki, S. K., Gafeira, R., et al. Transverse Oscillations in Slender Ca II H Fibrils Observed with Sunrise/SuFI[J], The Astrophysical Journal Supplement Series, 2017,229, 9
[55] Gafeira, R., Jafarzadeh, S., Solanki, S. K., et al. Oscillations on Width and Intensity of Slender Ca II H Fibrils from Sunrise/SuFI[J], The Astrophysical Journal Supplement Series, 2017,229, 7
[56] Jafarzadeh, S., Solanki, S. K., Stangalini, M., et al.High-frequency Oscillations in Small Magnetic Elements Observed with Sunrise/SuFI[J], The Astrophysical Journal Supplement Series,2017, 229, 10
[57] Wiegelmann, T., Neukirch, T., Nickeler, D. H., et al. Magneto-static Modeling from Sunrise/IMaX: Application to an Active Region Observed with Sunrise II[J], The Astrophysical Journal Supplement Series, 2017, 229, 18
[58] Smitha, H. N., Anusha, L. S., Solanki, S. K., et al. Estimation of the Magnetic Flux Emergence Rate in the Quiet Sun from Sunrise Data[J], The Astrophysical Journal Supplement Series, 2017, 229, 17
[59] Centeno, R., Blanco Rodríuez, J., Del Toro Iniesta, J. C., et al. A Tale of Two Emergences: Sunrise II Observations of Emergence Sites in a Solar Active Region[J], The Astrophysical Journal Supplement Series, 2017,229, 3
[60] Chitta, L. P., Peter, H., Solanki, S. K., et al.Solar Coronal Loops Associated with Small-scale Mixed Polarity Surface Magnetic Fields[J], The Astrophysical Journal Supplement Series, 2017, 229, 4
[61] Kaithakkal, A. J., & Solanki, S. K.Cancelation of small-scale magnetic features[J], Astronomy & Astrophysics, 2019, 622, A200
[62] Kaithakkal, A. J., Riethmüller, T. L., Solanki, S. K., et al. Moving Magnetic Features around a Pore[J], The Astrophysical Journal Supplement Series, 2017, 229, 13

[63] Danilovic, S., Hirzberger, J., Riethmüller, T. L., et al. Comparison between Mg II k and Ca II H Images Recorded by SUNRISE/SuFI[J], The Astrophysical Journal , 2014, 784, 20
[64] Danilovic, S., Solanki, S. K., Barthol, P., et al. Photospheric Response to an Ellerman Bomb-like Event—An Analogy of Sunrise/IMaX Observations and MHD Simulations[J], The Astrophysical Journal Supplement Series, 2017,229, 5

Overview of Balloon-Borne Solar Telescope–SUNRISE

LIU, Yanxiao[1], SONG, Tengfei[2], ZHANG, Tao[2], HUANG, Min[3], LV, Qunbo[3], XIANG, Lei[3], XIA, Lidong[4], SUN, Mingzhe[4], SONG, Hongqiang[4], TIAN, Hui[5,6], ZHANG, Hongxin[7], SONG, Haijun[8], YANG, Xiaoxu[8], ZHANG, Xuefei[2], WANG, Jingxing[2], LIU, Yu[2], JIN, Zhenyu[2], JIANG, Chaowei[1,9], LIN, Jun[2,10,11]
(1. Institute of Space Science and Applied Technology, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, Guangdong 518055, China;
2.Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650216, China;
3. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
4. Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai, Shandong 264209, China;
5. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;
6. Key Laboratory of Solar Activity, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China
7. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanical and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;
8. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shanxi 710119, China;
9. SIGMA Weather Group, State Key Laboratory for Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
10. Center for Astronomical Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;
11. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The advantage is unique to observe the solar evolution and monitor solar activities by using the balloon-borne solar telescope launched into the stratosphere of the Earth's atmosphere. First of all, observation of the balloon-borne telescope in the stratosphere is not disturbed by the climate phenomena in the troposphere, and is in a seeing-free environment, which provides a wonderful condition for obtaining solar images of high quality. Second, the air in the stratosphere is very tenuous, and the absorption in the ultraviolet wavelength weakens apparently, so the balloon-borne telescope is able to observe solar activities and eruptions in the near-ultraviolet wavelength. Third, the cost could be lowed and the efficiency could be enhanced significantly by using the balloon-borne telescopes via recycling, upgrading, and reusing. This is much more economical and practical than by using the space-borne telescopes. It has been more than half a century since the balloon-borne telescope was first launched in the Europe and the USA. This work is going to briefly look back the history of the balloon-borne solar telescope missions, including the rich experience in the instrument development and observations. The payloads of the

SUNRISE, a European balloon-borne solar telescope mission, are described in this work, and large amount of the high quality data obtained by the SUNRISE, as well as the consequent scientific articles produced on the basis of these data are also introduced. The information revealed here would be valuable and important for reference in developing the balloon-borne telescope in China.

Key words: Balloon-borne missions; Solar telescopes; High spatial resolution; High time cadence